

# ANÁLISE DE ESTRUTURAS RETICULADAS PRISMÁTICAS DE CONCRETO REFORÇADO COM GFRP

Pedro Antonio Lima Lindoso<sup>1</sup>

Andre Sarkis Muller<sup>2</sup>

## RESUMO

O presente trabalho busca desenvolver um modelo computacional para a análise do comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP). O interesse na utilização desse material deve-se às suas propriedades mecânicas e à resistência à corrosão, tornando-o uma alternativa promissora ao aço, especialmente em regiões com agentes ambientais agressivos. No entanto a ausência de normas nacionais e a necessidade de adaptações para o dimensionamento de elementos estruturais armados com este material dificultam a sua ampla adoção na engenharia estrutural. O modelo computacional utilizado foi implementado na linguagem Java, adaptando um código-base que previamente realizava o dimensionamento de seções de concreto armado convencionais para incluir a consideração de barras de GFRP. Para assegurar que o comportamento obtido no código correspondesse ao comportamento real do material foram realizadas modificações no código no que tange variáveis como rigidez, deformação e tensão dos materiais, isso foi realizado por meio da inclusão e alterações de módulos no código. Nesta etapa foram modelados pilares idênticos aos experimentados empiricamente por Souza (2021) e a partir dos gráficos tensão x deformação gerados em seu estudo pretende-se verificar a capacidade do modelo aqui desenvolvido de representar com fidelidade a ruptura de estruturas armadas com este material. Implementou-se ainda um procedimento automático, inspirado no P-Calc (Cardoso Júnior & Kimura, 2013), para geração das coordenadas das barras, reduzindo intervenções manuais e ampliando a flexibilidade de modelagem. Todos os valores de referência para deformação limite, módulo de elasticidade, ajustes na resistência a tração e compressão do GFRP foram extraídos a partir de referências experimentais (Souza, 2021). Os resultados numéricos obtidos indicam que o modelo é funcional como ferramenta de simulação e investigação, embora apresente tendência à superestimação da capacidade em comparação a referências experimentais em alguns cenários, o que reforça a necessidade de critérios de ruína específicos e maior base experimental de validação. Como desdobramentos, prevê-se a inclusão de rotinas de

<sup>1</sup> Autor: Graduando em Engenharia Civil, IFMA – Campus Monte Castelo, e-mail: pantonio@acad.ifma.edu.br.

<sup>2</sup> Professor-orientador: Dr em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas, IFMA Campus Monte Castelo, e-mail: andre.muller@ifma.edu.br.

verificação de plausibilidade numérica, implementação de critérios de falha próprios do GFRP e extensão do modelo para análise dinâmica e de cargas cíclicas, visando adequar a ferramenta às condições reais de projeto e investigação.

**PALAVRAS-CHAVE:** GFRP; Modelo Computacional; Tensão-Deformação; Concreto Armado.

**FINANCIAMENTO:** Instituto Federal do Maranhão (IFMA), Edital PRPGI nº 14/2024.

## **INTRODUÇÃO**

A busca pela utilização de materiais alternativos para o ramo da construção civil é uma constante quando se trata de pesquisa e desenvolvimento, seja por eles apresentarem menor impacto ambiental durante o processo de fabricação, ou oferecendo características superiores aos seus antecessores como maior longevidade ou resistência. Há relativamente pouco tempo, observou-se um crescimento nas pesquisas sobre a utilização de FRP (Fiber Reinforced Polymer) como armaduras em estruturas de concreto armado, isso se deve, dentre inúmeras vantagens apresentadas pelos materiais poliméricos, à sua resistência a corrosão quando comparados a barras metálicas, resultando diretamente em maior longevidade para as edificações. Os materiais FRP são compósitos formados pela combinação de dois componentes: um material de reforço, composto por fibras, e uma matriz polimérica (resina), responsável por envolvê-las. Essa configuração busca conferir ao material propriedades físicas e mecânicas particularmente desejadas (PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE, 2021).

Porém, assim como toda inovação observada, a indústria sempre se baseará em três pilares fundamentais para avançar com sua implementação: segurança, economia e velocidade de execução. Tendo isto em mente, os materiais poliméricos seguem sem perspectiva de ampla adoção à medida que ainda não existem normas nacionais que regulem seu uso, junto ao limitado número de pesquisas que estudem o comportamento deste material submetido a escalas reais. Conforme destacado por Mazzú (2020), é necessário desenvolver adaptações para o processo de dimensionamento de estruturas com armaduras FRP devido as suas propriedades não metálicas.

Apesar dos entraves para a implementação das armaduras FRP no mercado, as vantagens de normatizar o seu uso tornam-se evidentes ao analisarmos contextos locais que abrigam estruturas próximas ao litoral, sujeitas a ação corrosiva da maresia. Tal corrosão, que afeta de maneira acentuada as estruturas de aço, é notória na cidade de São Luís - MA, onde as estruturas

em concreto armado estão constantemente expostas a um ambiente impregnado por íons de cloreto, dióxido de carbono e outros agentes que reduzem consideravelmente a vida útil das armaduras. Para além da característica anticorrosiva as armaduras poliméricas ainda apresentam elevada resistência mecânica, densidade significativamente inferior à do aço, o que facilita o transporte, além de possuir transparência eletromagnética, tornando-o aplicável em ambientes como salas de ressonância magnética (ACI 440.1R, 2015).

Diante do exposto, o desenvolvimento de modelos computacionais que simulem o comportamento destas estruturas dispensando experimentações práticas, que muitas vezes apresentam um custo elevado, apresentam enormes benefícios para o entendimento destes materiais.

Neste trabalho é apresentado a modelagem de elementos de concreto armados com barras de polímeros reforçados com fibras de vidro, ou GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), submetidas a carregamentos distintos, com a finalidade de estabelecer um modelo confiável para se analisar o comportamento deste material e verificar sua viabilidade como alternativa para o aço em elementos estruturais de concreto. A metodologia aqui a ser adotada permite a discretização da seção transversal do elemento de concreto armado com GFRP em pequenas células de submetidas a carregamentos normais e de momentos fletores em relação ao eixo X e Y, de forma que o modelo possa ser reproduzido futuramente para seções quaisquer, independentemente dos esforços solicitantes ou da geometria da seção. Dessa forma, esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento na área, fornecendo uma base para estudos futuros voltados à inovação em materiais estruturais, especialmente no que tange à compreensão aprofundada de suas propriedades mecânicas e ao seu impacto no desempenho de elementos de concreto armado.

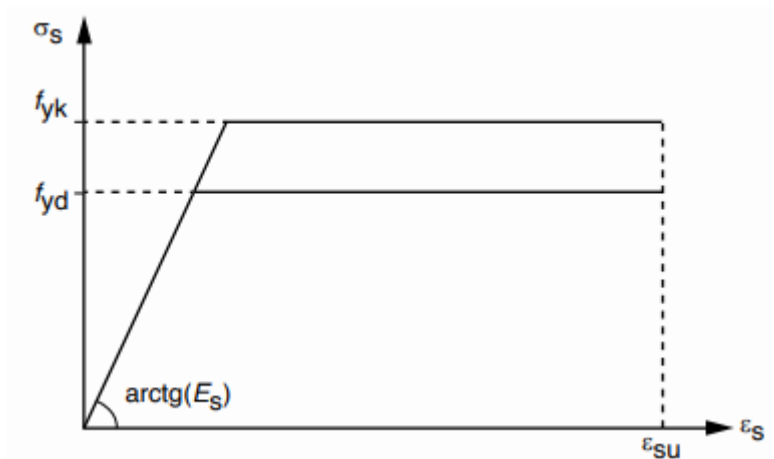
## **MÉTODOLOGIA**

Este trabalho originou-se com a ideia de realizar uma adaptação de um módulo de análise não linear do programa “Lacker”. Sendo este módulo já capaz de realizar a análise de uma viga de concreto armada convencional a partir de uma metodologia semelhante a desenvolvida por Cardoso Júnior e Kimura (2013), bastaria realizar alterações aos parâmetros do código que dizem respeito ao módulo de elasticidade das armaduras metálicas, conhecendo-se que o GFRP desempenha um comportamento a tração e compressão similar ao aço. A pesquisa se comprometeu a realizar essas modificações e com o código obtido realizar comparações com

testes empíricos, neste caso com os resultados obtidos a partir dos trabalhos de Souza (2021), onde foi registrado o comportamento de pilares de GFRP submetidos a diversos carregamentos.

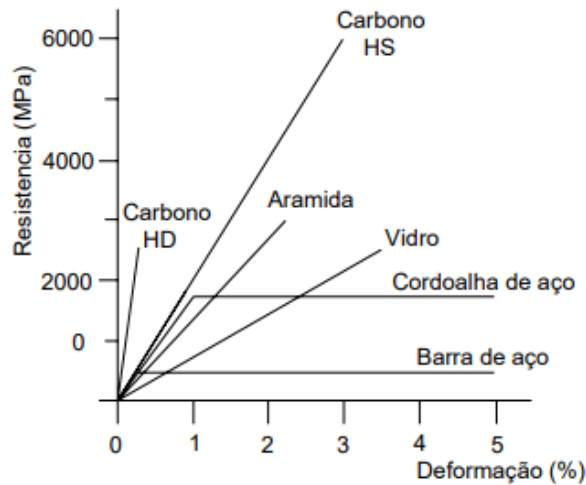
A semelhança do GFRP para com o aço está justamente em seu comportamento elástico linear, enquanto a norma brasileira, NBR 6118:2023, representa o aço como um material com um regime elástico linear até o seu escoamento, onde a partir deste limite se assume que o material continua a deformar sem demonstrar variação de tensão, ou seja, atingindo a plasticidade como evidenciado na figura 1, o GFRP é tratado pela norma americana, ACI 440.1R (2015), como um material elástico linear perfeito, tendo toda sua deformação restituída no momento que a força atuante sobre o material é removida, desta forma o material não apresenta um “patamar de escoamento” como o aço, possuindo uma ruptura abrupta e sem aviso, como demonstrada na figura 2.

Figura 1: Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



Fonte: NBR 6118, 2023.

Figura 1: Diagrama tensão x deformação GFRP



Fonte: Couto, 2007.

Como observado na figura 2, o GFRP consegue atingir tensões superiores as de escoamento de barras de aço, como apontado por Tavares (2006), este fato é dado pela característica anisotrópica do material, sendo sua elevada resistência concentrada na direção longitudinal, reduzindo, por outro lado, seu desempenho ao cisalhamento e sua aderência ao concreto.

Tomando como ponto de partida para o método numérico uma seção, seção arbitrária submetida simultaneamente a carregamento normal e momentos fletores em ambos os eixos de simetria ( $N_z, M_x$  e  $M_y$ ), assumindo como “n” o número de barras da armadura, as equações dos esforços que expressam o equilíbrio da seção podem ser descritas da seguinte forma:

$$N_z = \int_A \sigma_z^c dA + \sum_{i=1}^n \sigma_z^{s,i} A_{s,i}$$

$$M_x = \int_A y \sigma_z^c dA + \sum_{i=1}^n y_i \sigma_z^{s,i} A_{s,i}$$

$$M_y = - \left( \int_A x \sigma_z^c dA + \sum_{i=1}^n x_i \sigma_z^{s,i} A_{s,i} \right)$$

Onde:

- $\sigma_z^c$ : é a tensão de compressão no nível do centroide da área dA;
- $\sigma_z^{s,i}$ : é a tensão no aço no nível do centroide da barra j;
- $x$  e  $y$ : são as coordenadas no nível do centroide da área dA;
- $x_i$  e  $y_i$ : são coordenadas no nível do centroide da barra;
- $A$ : é a área de concreto resistindo as tensões de compressão;

- $A_{s,i}$ : é a área de aço das barras.

Uma vez que conhecidas as equações que descrevem as ações que incidem sobre a seção transversal, podemos verificar se a seção resiste aos esforços solicitantes, estes também conhecidos, desta forma nosso problema consiste em resolver  $r(U) = f_{ext} - f_{int}(U) = 0$ , ou seja, encontrar um vetor de deformações ( $U$ ) que equilibre a equação de vetores de esforços internos  $f_{int}(U)$  com os esforços externos. Para isso, emprega-se o método de Newton-Raphson, que busca a solução de forma incremental e iterativa.

A ideia central do método é linearizar o problema não linear em torno de uma estimativa inicial, de modo que, a cada iteração, obtém-se uma aproximação mais próxima da solução real. Essa linearização é feita através da expansão de Taylor do resíduo  $r(U)$ , cuja derivada em relação a  $U$  gera a matriz Jacobiana. No contexto estrutural, essa matriz corresponde à rigidez tangente  $K_t(U)$ , que traduz a sensibilidade das forças internas frente a variação dos deslocamentos. Assim, a fórmula escalar do Newton-Raphson se transforma no sistema linear  $K_t(U)\Delta U = r(U)$ .

Nesta equação  $r(U)$  é o vetor resíduo (a diferença entre forças externas e internas no estado atual),  $K_t(U)$  é a matriz de rigidez tangente atualizada a cada iteração, e  $\Delta U$  é a correção dos deslocamentos que deve ser adicionada à estimativa corrente de  $U$ . O processo repete-se de forma incremental: aplica-se um chute inicial, monta-se a matriz de rigidez, calcula-se o resíduo, resolve-se o sistema para  $\Delta U$ , atualiza-se  $U \leftarrow \Delta U + U$  e reavalia-se o equilíbrio. O ciclo se mantém até que as correções sejam desprezíveis, indicando que a estrutura atingiu o estado de equilíbrio.

Ao desenvolvermos a matriz Jacobiana com as forças internas da nossa estrutura genérica, ficamos com a seguinte matriz de rigidez:

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} -\int_A D^c dA - \sum_{i=1}^n D_i^s A_i^s & -\int_A D^c y dA - \sum_{i=1}^n D_i^s y_i^s A_i^s & \int_A D^c x dA + \sum_{i=1}^n D_i^s x_i^s A_i^s \\ -\int_A D^c y dA - \sum_{i=1}^n D_i^s y_i^s A_i^s & \int_A D^c dA - \sum_{i=1}^n D_i^s (y_i^s)^2 A_i^s & \int_A D^c x y dA + \sum_{i=1}^n D_i^s x_i^s y_i^s A_i^s \\ \int_A D^c x dA + \sum_{i=1}^n D_i^s x_i^s A_i^s & \int_A D^c x y dA + \sum_{i=1}^n D_i^s x_i^s y_i^s A_i^s & \int_A D^c dA - \sum_{i=1}^n D_i^s (x_i^s)^2 A_i^s \end{pmatrix}$$

É possível notar que os termos  $D^c$  e  $D^s$  se referem a rigidez do concreto e do aço respectivamente, é possível obter esses valores a partir do diagrama tensão deformação de ambos os materiais.

Aplicando o conceito de rigidez,  $D = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ , na equação referente ao comportamento do diagrama tensão-deformação do concreto, obtém-se:

$$D^c = \begin{cases} 0 & \text{para } \varepsilon^c \geq 0 \\ \frac{0,85\eta_c f_{cd} n}{\varepsilon_{c2}} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^{n-1} & \text{para } 0 > \varepsilon^c > \varepsilon_{c2} \\ 0 & \text{para } \varepsilon^c \leq \varepsilon_{c2} \end{cases}$$

Aplicando o mesmo raciocínio ao aço, temos a equação adaptada para:

$$D^s = \begin{cases} 0 & \text{para } |\varepsilon^s| \geq \varepsilon_{yd} \\ E^s = \frac{f_{yd}}{\varepsilon_{yd}} & \text{para } |\varepsilon^s| < \varepsilon_{yd} \end{cases}$$

Já para casos em que utilizaremos barras de GFRP, trabalhando junto ou no lugar do aço, temos um caso um pouco diferente, nele a rigidez segue constante até a ruptura, isso devido a este material não apresentar um comportamento não linear, chamaremos aqui a rigidez desse material de  $D^f$ .

$$D^f = E^f = \frac{f_{ftd}}{\varepsilon_{ftd}} = \frac{f_{fcd}}{\varepsilon_{fcd}} \cong 50\text{GPa}$$

Como o GFRP apresenta resistências máximas a compressão e a tração distintas, assim como deformações limites para ambos os esforços, neste trabalho foi convencionado um módulo de elasticidade de 50GPa para o material, pois como demonstrado nos trabalhos experimentais de Souza (2021), o módulo assume valores muito próximos para ambos os comportamentos sendo  $50 \pm 2,2$  para a tração e  $51 \pm 5,1$  para a compressão.

## RESULTADOS E CONCLUSÕES

A verificação numérica realizada com o módulo adaptado revelou diferenças quantitativas relevantes quando comparada às referências adotadas. Para a seção armada integralmente com aço ( $f_{ck} = 30$  MPa; seção  $20 \times 30$  cm;  $4\text{Ø}16$  CA-50), a análise do código indicou ruptura para um momento fletor de aproximadamente 8 kNm sob esforço normal da ordem de 300–348 kN, enquanto o software de referência P-Calc sinalizou falha para  $\approx 5$  kNm nas mesmas condições geométricas e materiais.

Em termos numéricos isto corresponde a uma diferença absoluta de 3 kNm e uma diferença relativa da ordem de +60%, ou seja, o modelo numérico desenvolvido tende a indicar maior capacidade resistente daquela prevista pelo P-Calc. No caso do pilar integralmente armado com GFRP estudado a partir de Souza (2021), o nosso modelo estimou faixa de ruptura em torno de 4440 kN de esforço axial, contrapondo-se à perda de capacidade observada experimentalmente por volta de 3300 kN, diferença absoluta de 1140 kN e diferença relativa de  $\approx +34,5\%$ , novamente apontando para uma superestimação da capacidade pelo modelo.

A discretização empregada (100 fatias para o concreto; 4 valores para as barras de aço) mostrou-se adequada para representação dos campos de deformação, mas as discrepâncias sistemáticas, menos conservador em relação ao P-Calc para o caso aço e superestimação frente ao ensaio para o caso GFRP, sugerem que a diferença provenha principalmente de: formulação constitutiva e critérios de ruptura adotados, ausência de certas degradações ou modos de instabilidade nos modelos de GFRP, e diferenças nos fatores de redução aplicados entre os códigos. Em face disso, recomenda-se incorporar limites de plausibilidade e critérios de parada explícitos e revisar os modelos constitutivos e fatores de segurança para reduzir a tendência à superestimação e permitir comparações mais robustas com referências analíticas e experimentais.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O módulo desenvolvido para o programa Lacker mostrou-se um ponto de partida promissor para análises não lineares em estruturas armadas com GFRP, apesar das limitações frente ao comportamento experimental. Desafios como modelar o escorregamento das barras, as discrepâncias em compressão e a dificuldade de calibrar critérios de ruptura indicam a necessidade de ajustes. Melhorias desejáveis incluem maior flexibilidade no arquivo de entrada, suporte a bitolas distintas, incorporação de cargas dinâmicas e sensibilidade térmica. Assim, embora funcional como prova de conceito, o modelo requer avanços para maior robustez numérica e melhor aderência a resultados empíricos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao IFMA pelo apoio financeiro por meio da bolsa concedida no Edital PRPGI nº 14/2024, bem como às instituições e colegas que contribuíram com suporte técnico e científico para a realização desta pesquisa

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 4. ed. Rio de Janeiro, 2023.

CARDOSO JÚNIOR, S. D.; KIMURA, A. E. Sistema computacional para análise não linear de pilares de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. Anais. São Paulo: IBRACON, 2013.

COUTO, I. A. Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/D.18.2007.tde-01102007-085339. Acesso em: 2025-06-15.

IBRACON/ABECE. Prática recomendada CT 303: Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). São Paulo, 2021.

MAZZÚ, A. D. E. (2020). Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

SOUZA, W. M. Comportamento de colunas de betão armado com varões de GFRP sob diferentes condições de carregamento. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021.